

герметизацией составляла  $25 \pm 1$  мин в среде азота и  $25 \pm 1$  мин в вакууме при такой же температуре (результат измерения – от 0,01 до 0,05 об.%).

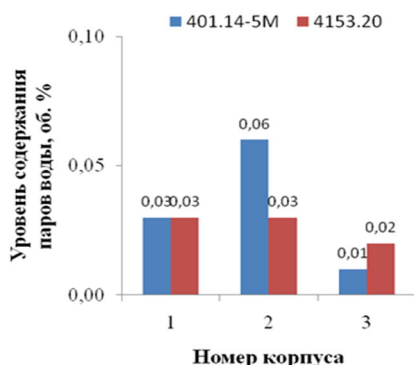


Рисунок 4 – значения уровня содержания паров воды при отжиге в вакуумной печи установки NAW корпусов 401.14-5М и 4153.20

Значения содержания паров воды в подкорпусном объеме сравнимы со значениями для образцов, загерметизированных в соответствии с требованиями действующей технической документации (от 0,01 до 0,04 об.%).

Обобщая все полученные результаты, приходим к следующим выводам:

- введение в техпроцесс предварительного отжига оснований корпусов в среде азота при температуре  $180 \pm 10$  °С в течение 3 часов позволило снизить уровень содержания паров воды в подкорпусном объеме с 0,17-0,98 об. % до 0,02-0,7 об. % для корпуса 401.14-5М с обеспечением стабильности и воспроизводимости результатов

- изменение режимов проведения ИК-отжига корпусов на устройстве ИК-нагрева, отжига в печи установки герметизации NAW-1105D перед герметизацией не влияют на уровень содержания паров воды в подкорпусном объеме.

УДК 539.23

### ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ $\text{SiO}_2$ НА ГИДРОФИЛЬНО/ГИДРОФОБНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПЕРФТОРДЕКАНОВОЙ КИСЛОТЫ, НАНЕСЕННЫХ НА КРЕМНИЕВУЮ ПОДЛОЖКУ

Хабарова А.В.<sup>1</sup>, Лапицкая В.А.<sup>1,2</sup>, Мельникова Г.Б.<sup>1</sup>, Кузнецова Т.А.<sup>1,2</sup>, Чижик С.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Методом атомно-силовой микроскопии проведено изучение структуры и шероховатости пленок, модифицированных методом Ленгмюра-Блоджетт высшей фторированной перфтордекановой Ас кислотой, а также суспензией на ее основе с наночастицами  $\text{SiO}_2$ , нанесенных на кремниевую подложку. Гидрофильно/гидрофобный баланс определяли методом капли с регистрацией краевого угла смачивания. Снижение шероховатости приводит к незначительному увеличению краевого угла смачивания и снижению полярной составляющей удельной поверхностной энергии поверхности кремния с нанесенной суспензией из высшей фторированной перфтордекановой Ас кислоты с наночастицами  $\text{SiO}_2$  (концентрация 3 мг). Это приводит к увеличению гидрофобных свойств поверхности.

**Ключевые слова:** перфторированные амфифильные кислоты,  $\text{SiO}_2$ , кремний, метод Ленгмюра-Блоджетт, атомно-силовая микроскопия.

### INFLUENCE OF $\text{SiO}_2$ NANOPARTICLES ON THE HYDROPHILIC/HYDROPHOBIC PROPERTIES OF FILMS BASED ON PERFLUORODECANOIC ACID DEPOSITED ON A SILICON SUBSTRATE

Khabarava A.<sup>1</sup>, Lapitskaya V.<sup>1,2</sup>, Melnikova G.<sup>1</sup>, Kuznetsova T.<sup>1,2</sup>, Chizhik S.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** Atomic force microscopy was used to study the structure and roughness of films modified by the Langmuir-Blodgett method with the highest fluorinated perfluorodecanoic acid, as well as a suspension based on it with  $\text{SiO}_2$  nanoparticles deposited on a silicon substrate. The hydrophilic/hydrophobic balance was determined by the drop method with registration of the contact angle. A decrease in roughness leads to a slight increase in the contact angle and a decrease in the polar component of the specific surface energy of the silicon surface with the applied suspension of higher fluorinated perfluorodecanoic acid with  $\text{SiO}_2$  nanoparticles (concentration 3 mg). This leads to an increase in the hydrophobic properties of the surface.

**Key words:** perfluorinated amphiphilic acids,  $\text{SiO}_2$ , silicon, Langmuir-Blodgett method, atomic force microscopy.

Адрес для переписки: Хабарова А.В., ул. П. Бровки, 15, Минск 220072, Республика Беларусь  
e-mail: av.khabarova@mail.ru

**Введение.** Важная составляющая развития нанотехнологий связана с успехами химического синтеза полимерных материалов, физические свойства которых могут быть широко модифицированы прививкой к основной полимерной цепи различных боковых групп. Технология Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) позволяет создавать конденсированные упорядоченные мономолекулярные слои полимеров, управлять их структурой, конструировать мультислойные пленки и создавать композиты с включениями наночастиц. Применение технологии ЛБ экономически выгодно, поскольку нет необходимости в применении высокого вакуума, нет больших энергозатрат и других дорогостоящих факторов. Благодаря разнообразию свойств синтезируемых органических соединений, такие пленки могут найти применение не только в элементах молекулярной электроники, но в сенсорных, мембранных и других устройствах [1]. Поверхностно-активные вещества и полимеры, полученные с помощью перфторалкильных и полифторалкильных веществ (ПФАВ), методом ЛБ, широко используются в различных промышленных целях из-за химической и термической стабильности, в дополнение к гидрофобной и липофобной природе ПФАВ [2].

Целью работы было изучение структуры и гидрофильно/гидрофобных свойств пленок из перфторированных амфифильных кислот и суспензий на их основе с наночастицами  $\text{SiO}_2$ , нанесенным методом ЛБ.

**Материалы и методы исследований.** Для формирования пленок использовали раствор перфтороктадекановой кислоты (AlfaAesar, 97 %,  $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_{16}\text{CO}_2\text{H}$ ) в гексафтор-бензоле (99 %, Sigma-Aldrich) с концентрацией 0,5 мг/мл. Наночастицы диоксида кремния (Sigma-Aldrich,  $d = 10\text{--}20$  нм) добавляли в массовом соотношении 1, 2 и 3 мг на 1 мл раствора перфторированной кислоты. Для равномерного распределения неорганических наночастиц в течение 15 мин растворы кислот обрабатывали ультразвуком.

Для выделения пленок перфторированных амфифильных кислот использовали установку «Автоматизированный комплекс для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями» (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь).

Для нанесения пленок кремниевые подложки предварительно проходили процедуру гидрофиллизации в пероксидно-аммиачном растворе в течение 15 мин при температуре 80 °С.

Морфологию, шероховатость, силу адгезии и удельную поверхностную энергию исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM стандартным кремниевым кантилевером типа CSG10\_SS (TipsNano, Российская Федерация) с радиусом закругления острия 10,4 нм и жесткостью консоли 0,51 Н/м.

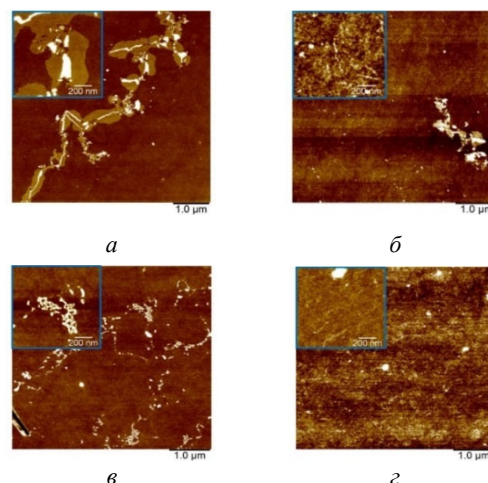
Краевой угол смачивания (КУС) измеряли на установке DSA 100 E (KRUSS, Германия) методом неподвижной капли. Значения удельной поверхностной энергии рассчитывали по модели ОВРК. В данной модели поверхностное натяжение рассматривается с точки зрения полярной и дисперсной составляющих.

**Результаты исследований и обсуждения.** При нанесении пленок перфтордекановой кислоты и суспензий на ее основе с наночастицами на поверхность кремния появляются конгломераты разных размеров (рис. 1, б и в), в которые собираются наночастицы диоксида кремния (исследуемые поля  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup> и  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup>).

При увеличении концентрации  $\text{SiO}_2$  до 3 мг пленка распределяется по поверхности равномерно (рис. 1, з). На полях  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup> видны структуры в виде цепочек. Нанесение перфтордекановой кислоты без  $\text{SiO}_2$  приводит к появлению на поверхности структур неправильной формы с признаками многослойного расположения слоев (рис. 1, а).

Выявлено, что введение наночастиц в состав раствора приводит к смещению площади на молекулу от 0,66 до 0,4 нм<sup>2</sup> для перфтордекановой кислоты. Это свидетельствует о равномерном встраивании наночастиц в структуру пленки кислоты.

КУС с увеличением содержания наночастиц  $\text{SiO}_2$  увеличивается (табл. 1) с 64,6 до 70,9°. Удельная поверхностная энергия и полярная составляющая уменьшаются с увеличением концентрации наночастиц в суспензии от 47,6 до 43,6 мДж/м<sup>2</sup> и от 11,1 до 8,3 мДж/м<sup>2</sup>. Шероховатость поверхности немонотонно уменьшается (табл. 2). Удельная поверхностная энергия (АСМ) имеет максимум значений по концентрации наночастиц 1 мг  $w = 99,5$  мДж/м<sup>2</sup>. Модуль упругости при увеличении концентрации  $\text{SiO}_2$  до 2 мг незначительно уменьшается, а затем значительно увеличивается при концентрации  $\text{SiO}_2$  3 мг от 394,4 до 745,9 МПа.



а – Ас; б – Ас с 1 мг  $\text{SiO}_2$ ;  
в – Ас с 2 мг  $\text{SiO}_2$ ; з – Ас с 3 мг  $\text{SiO}_2$

Рисунок 1 – АСМ-изображения поверхности кремния с ЛБ-пленками из перфтордекановой кислоты исходной и с добавлением наночастиц  $\text{SiO}_2$

Таблица 1. Влияние введения наночастиц на смачиваемость пленок на поверхностях, модифицированных перфтордекановой кислотой и суспензий на ее основе

Образец	КУС, вода	w, мДж/м <sup>2</sup>	$\gamma^p$ , мДж/м <sup>2</sup>
Ac	64,6	47,6	11,1
Ac с 1 мг SiO <sub>2</sub>	64,0	47,9	11,4
Ac с 2 мг SiO <sub>2</sub>	66,8	45,8	10,3
Ac с 3 мг SiO <sub>2</sub>	70,9	43,6	8,3

Таблица 2. Шероховатость, сила адгезии и удельная поверхностная энергия (АСМ) на поверхностях, модифицированных перфтордекановой кислотой и суспензий на ее основе

Образец	$R_a$ , нм	$R_q$ , нм	$R_z$ , нм	$F_{ад}$ , нН	w, мДж/м <sup>2</sup>	E, МПа
Ac	0,45	0,92	0,89	5,645	86,6	418,9
Ac с 1 мг SiO <sub>2</sub>	0,24	0,62	0,57	6,487	99,5	394,4
Ac с 2 мг SiO <sub>2</sub>	0,27	0,69	0,83	6,467	99,2	375,8
Ac с 3 мг SiO <sub>2</sub>	0,21	0,39	0,50	6,102	93,6	745,9

УДК 681.586.7

### ТОНКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ

Сапсалёв Д.В.<sup>1,2</sup>, Мельникова Г.Б.<sup>1</sup>, Аксучиц А.В.<sup>3</sup>, Толстая Т.Н.<sup>1</sup>, Котов Д.А.<sup>3</sup>, Чижик С.А.<sup>1,4</sup><sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси<sup>2</sup>Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>4</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрена возможность модификации никелевых покрытий тонкими пленками полиметилметакрилата и нанокompозитами полиметилметакрилат–наночастицы диоксида кремния для создания емкостных датчиков анализа содержания катионов тяжелых металлов в воде. Показано, что введение наночастиц диоксида кремния в структуру полимерной матрицы позволяет сформировать покрытия с более развитой поверхностью, что приводит к увеличению емкостных характеристиках датчика.

**Ключевые слова:** тонкие пленки полиметилметакрилата, нанокompозиты, атомно-силовая микроскопия, емкостные датчики.

### THIN POLYMERIC FILMS BASED ON POLYMETHYL METACRYLATE FOR ANALYSIS OF HEAVY METAL CATIONS IN WATER

Sapsaliou D.<sup>1,2</sup>, Melnikova G.<sup>1</sup>, Aksuchyts A.<sup>3</sup>, Tolstaya T.<sup>1</sup>, Kotov D.<sup>3</sup>, Chizhik S.<sup>1,4</sup><sup>1</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus<sup>2</sup>Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank<sup>3</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>4</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The possibility of modifying nickel coatings with thin films of polymethyl methacrylate and nanocomposites of polymethyl methacrylate–silicon dioxide nanoparticles to create capacitive sensors for analyzing the content of heavy metal cations in water is considered. It is shown that the introduction of silicon dioxide nanoparticles into the structure of the polymer matrix makes it possible to form coatings with a more developed surface, which leads to an increase in the capacitance characteristics of the sensor.

**Key words:** polymethyl methacrylate thin films, nanocomposites, atomic force microscopy, capacitive sensors.

Адрес для переписки: Сапсалёв Д.В., ул. Советская, 18, Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: dsapsalev@list.ru

Емкостные датчики широко используются в промышленности, медицине и экологии [1–3]. Несмотря на преимущества применения емкостных датчиков (экономическая эффективность, простота

Снижение шероховатости приводит к незначительному увеличению краевого угла смачивания и снижению полярной составляющей удельной поверхностной энергии, определенных методом капли. Т.е. эти изменения приводят к увеличению гидрофобных свойств поверхности.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках задания 3.03.3 ГПНИ «Конвергенция–2025» на 2021–2025 гг.

#### Литература

1. Клечковская, В. В. Пленки Ленгмюра-Блоджетт – материалы нанотехнологий настоящего и будущего / Клечковская В. В., Фейгин Л. А. – Вестник РФФИ. – 2014. – № 2 (82). – С. 35–44.

2. Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins. Integr / R. C. Buck [et al.] // Environ. Assess. Manag. – 2011. – Vol. 7. – P. 513–541.